Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 1, с. 3 – 9 © 2021 г. 10 января

Влияние лазерного излучения вблизи 1.5 мкм на параметры фотолюминесценции ансамбля NV-центров в алмазе

М. А. Смирнов[a 1)], М. М. Миннегалиев[a], И. В. Федотов[a,b,c,d,f], С. А. Моисеев[a], А. М. Желтиков[a,b,c,d,e]

[a] Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, 420111 Казань, Россия

[b] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

[c] Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station TX 77843, USA

[d] Российский квантовый центр, 143025 Сколково, Москва, Россия

[e] Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия

[f] Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 119049 Москва, Россия

Поступила в редакцию 13 октября 2020 г.
После переработки 13 ноября 2020 г.
Принята к публикации 19 ноября 2020 г.

Экспериментально исследовано влияние лазерного излучения с длиной волны вблизи 1.55 мкм на фотолюминесцентные свойства центров окраски "азот-вакансия" (NV) в алмазе. Под воздействием инфракрасного лазера в ансамбле NV-центров происходит перераспределение спектральной интенсивности фотолюминесценции, вызванное влиянием излучения на зарядовое состояние центров окраски. При этом в случае нейтрально заряженных NV-центров наблюдалось гашение фотолюминесценции, которое достигало $\sim 60\,\%$. Отличительной особенностью лазерного возбуждения NV-центров данным методом является отсутствие конкуренции со стороны процессов стимулированной эмиссии и двухфотонного возбуждения, которая наблюдается с увеличением мощности инфракрасного излучения на других длинах волн.

DOI: 10.31857/S1234567821010018

Центры окраски в кристалле алмаза со структурой "азот-вакансия" (NV) вызывают широкий интерес благодаря их применению в качестве однофотонных эмиттеров [1, 2], сенсоров температуры [3–8] и магнитных полей [9–13], а также в микроскопии сверхвысокого разрешения [14–16], позволяющей преодолевать дифракционный предел в оптике. Наиболее популярными методами получения изображения с субдифракционным разрешением являются микроскопия структурированного освещения [17, 18], локализационная микроскопия одиночных молекул [19, 20] и микроскопия на основе опустошения (люминесценции) вынужденным излучением [21, 22] или опустошения зарядового состояния [15]. Как правило, здесь сверхвысокое разрешение достигается либо за счет пространственного и/или временного модулирования перехода люминофора из одного молекулярного состояния в другое. Использование NV-центров в этих методах позволяет получить изображение с существенно более высоким разрешением, по сравнению с другими люминофорами [22].

NV-центры могут находиться в двух зарядовых состояниях – отрицательно заряженном (NV^-) и нейтральном (NV^0). Их фотолюминесцентные свойства различаются и характеризуются бесфононными линиями (БФЛ) вблизи 637 нм (NV^-) и 575 нм (NV^0), а также широкими фононными крыльями с максимумами вблизи 700 и 650 нм соответственно [3, 23]. Фотохромные эффекты, наблюдаемые в NV-центрах, связаны с переводом центра окраски из одного зарядового состояния в другое. На рисунке 1 показана наиболее распространенная схема такого перевода [24–27], полученная преимущественно на основе анализа данных от одиночных центров окраски. Данная схема предполагает участие двух фотонов при ионизации ($NV^- \to NV^0$) и двух фотонов при рекомбинации ($NV^0 \to NV^-$) центра окраски, как показано на рис. 1. В обоих случаях первый фотон поглощается центром окраски и переводит его на верхний энергетический уровень (^{3}E для NV^- или ^{2}E для NV^0), а второй фотон переводит центр окраски из одно-

[1)] e-mail: maxim@kazanqc.org

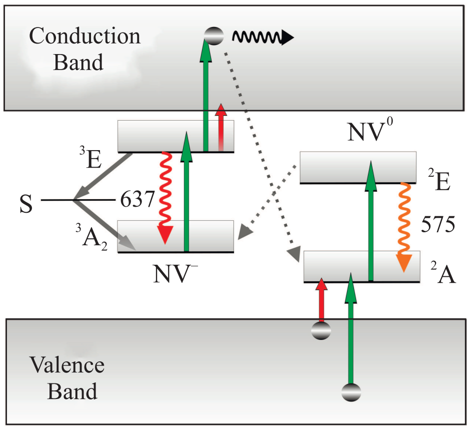

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема энергетических уровней NV-центров в алмазе: зелеными прямыми стрелками показаны процессы возбуждения зеленым лазером, волнистыми стрелками показана соответствующая люминесценция (БФЛ), красными прямыми стрелками обозначены процессы возбуждения, происходящие при облучении инфракрасным лазером, серыми прямыми стрелками показана безызлучательная релаксация через синглетный уровень NV$^-$, пунктирные стрелки соответствуют переходам NV-центра между зарядовыми состояниями

го зарядового состояния в другое. Математическое моделирование на основе данной модели [25, 28, 29] показывает, что поглощение второго фотона и последующее переключение зарядового состояния может быть с хорошей точностью охарактеризовано с помощью соответствующего эффективного сечения поглощения (σ), значение которого зависит от параметров возбуждающего излучения.

Применение ближнего инфракрасного (ИК) лазерного излучения в качестве контролирующего оптического поля может позволить увеличить эффективность управления зарядовым состоянием NV-центра, поскольку в данном случае не происходит прямого возбуждения внутренних электронных уровней. В работах [28–32] рассматривалось влияние ближнего ИК излучения с длинами волн вблизи 750 и 1064 нм. При этом в работах [31, 32] было продемонстрировано, что эффект зарядовой модуляции излучения сохраняется как для случая CVD алмазов с одиночными центрами окраски, так и в случае наноразмерных алмазов (~ 50 нм) с высоким содержанием NV-центров (более 100 NV-центров в наночастице, что соответствует значениям концентрации центра окраски $\sim$ единиц ppm). Однако с процессами зарядового преобразования NV-центра могут конкурировать процессы, связанные либо с вынужденным излучением [31], либо с двухфотонным поглощением [26, 33], вероятность которых увеличивается с ростом мощности управляющего излучения. Данное обстоятельство можно обойти при использовании лазерного излучения вблизи 1.55 мкм, поскольку данная длина волны, а также ее вторая гармоника, лежат вне электронных переходов NV-центра. Насколько нам известно, на данный момент в литературе не освещалось влияние ИК лазерного излучения с длиной волны вблизи 1.55 мкм на зарядовое состояние NV-центра.

В данной работе экспериментально исследовались фотолюминесцентные свойства алмаза с высокой плотностью NV-центров при его облучении непрерывным зеленым лазером (532 нм) и непрерывным ИК лазером (1528 нм). В ходе исследования были получены зависимости спектральной интенсивности фотолюминесценции NV-центров для каждого из зарядовых состояний от мощности используемых лазеров, а также были проведены предварительные оценки динамических параметров процессов зарядового преобразования центра окраски, протекающих в алмазе при данных условиях.

В экспериментах исследовался HPHT алмаз (Element Six SDB1125) размером ~ 180 мкм. Концентрация замещающего азота в алмазе составляла $\sim 10^{20}$ см$^{-3}$ (~ 600 ppm) по данным производителя. Образец облучали электронами с энергией несколько МэВ с плотностью потока 10^{18} эл/см^2, а затем отжигали при температуре ~ 800 °C в инертном газе в течение 1.5 ч. В результате обработки в алмазе образовывались различные дефекты, в том числе, NV-центры, которые в дальнейшем изучались. По нашим оценкам при таких параметрах алмаза и способе его обработки результирующая концентрация NV-центров находится в диапазоне от 1 до 100 ppm.

Для изучения возможности управления зарядовым состоянием NV-центров была собрана установка по оптической микроскопии. Для возбуждения центров окраски использовались непрерывный стабилизированный по частоте и интенсивности зеленый лазер с длиной волны 532 нм. В качестве управляющего зарядовым состоянием лазера применялся непрерывный диодный лазер с излучением в диапазоне длин волн от 1528 до 1560 нм (Toptica CTL-1500). Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2a. Излучение с выхода управляющего диодного лазера поступало на усилитель (Keopsys CEFA-C-PB-LP-SM), после которого направлялось на оптическую схему. Излучение от обоих лазеров смешивалось с помощью дихроичного зеркала (DM1) с полосой отсечения вблизи 950 нм и поступало на фокусирующий объектив. В качестве

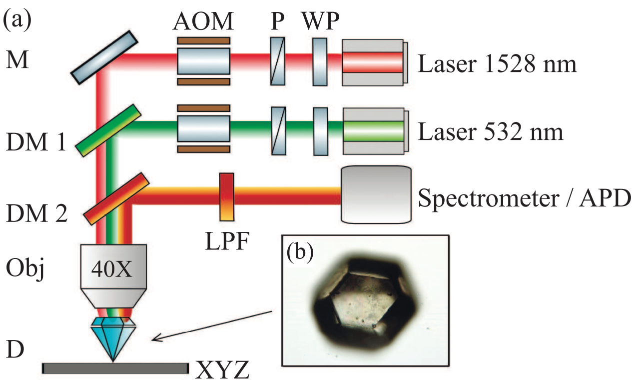

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Принципиальная оптическая схема экспериментальной установки по изучению NV-центров: AOM – акусто-оптический модулятор, P – поляризатор, WP – полуволновая пластина, M – зеркало, DM1 – дихроичное зеркало с пропусканием выше 950 нм, DM2 – дихроичное зеркало с пропусканием в диапазоне 400–550 нм и выше 1500 нм, Obj – 40-кратный объектив, D – исследуемый алмаз с NV-центрами, XYZ – предметный столик с 3-х координатной подачей, LPF – отсекающий фильтр, Laser 532 nm – возбуждающий зеленый лазер (532 нм), Laser 1528 nm – модулирующий инфракрасный лазер (1528 нм), Spectrometer/APD – регистрирующая система, состоящая, либо из спектрометра либо из детектора на основе лавинного фотодиода. (b) – Изображение исследуемого алмаза, полученное с помощью оптического микроскопа. Размер алмаза составляет ~ 150 мкм

второго дихроичного зеркала (DM2), пропускающего возбуждающее излучение и отражающее фотолюминесценцию, выступал отсекающий фильтр с полосой пропускания в диапазоне от 400 до 550 нм и выше 1500 нм. Для фокусировки возбуждающего излучения на поверхность образца использовался 40X объектив (40X, Olympus Plan Achromat Objective, 0.65 NA). Мощность лазеров регулировалась с помощью поляризатора и полуволновой пластинки, а также парой акусто-оптических модуляторов (AOM, Brimrose TEF-200-50-600, AA-Optoelectronics MT-80-B42A0,7-1300.1600), которые также были использованы для получения оптических импульсов в экспериментах по изучению динамики зарядовых состояний. Представленная экспериментальная установка позволяет независимо оптически возбуждать исследуемый объект с помощью зеленого и ИК лазеров (см. рис. 1a). Спектры люминесценции регистрировались с помощью спектрометра (OceanOptics HR4000). Для измерения динамических характеристик фотолюминесцентного отклика вместо спектрометра использовался фотодетектор на основе лавинного диода (Thorlabs APD120A/M), сигнал с которого поступал на осциллограф (Tektronix DPO 7104C). При проведении экспериментов мощность зеленого лазера варьировалась от 100 мкВт до 15 мВт, мощность ИК лазера варьировалась в интервале от 0 до 30 мВт (значения после объектива). Исследуемый алмаз плотно прижимался к предметному стеклу с помощью покровного стекла, через которое и осуществлялось оптическое возбуждение. Изображение верхней грани исследуемого алмаза представлено на рис. 2b и было получено с помощью стандартного оптического микроскопа.

На рисунке 3a представлены экспериментальные спектры фотолюминесценции (PL), полученные при возбуждении исследуемого образца с помощью зеленого излучения (532 нм, 1 мВт, $\mathrm{PL}_{\mathrm{GREEN}}$), а также при добавлении к нему инфракрасного излучения (1528 нм, 30 мВт, $\mathrm{PL}_{\mathrm{GREEN+NIR}}$). Данные спектры демонстрируют значительное подавление люминесценции для NV^0 центров. Для оценки изменения спектра люминесценции от обоих зарядовых состояний центра, мы вычли один спектр из другого ($\Delta\mathrm{PL} = \mathrm{PL}_{\mathrm{GREEN+NIR}} - \mathrm{PL}_{\mathrm{GREEN}}$). Полученные таким образом разностные спектры (ΔPL) представлены на рис. 3b. На рисунке видна картина, свойственная перераспределению населенностей зарядовых состояний в результате ионизационно-рекомбинационных процессов. При указанных параметрах накачки гашение люминесценции от NV^0 достигает 50 %, в случае NV^- значения модуляции гораздо меньше и прирост составляет около 4 %. Далее на рис. 3c представлена зависимость нормированных значений интенсивности люминесценции NV^0 от мощности ИК лазерного излучения, где в качестве нормировочного коэффициента использовалось значение люминесценции при облучении только зеленым лазером (532 нм, 1 мВт). Полученная зависимость показывает нелинейный спад сигнала с ростом мощности ИК излучения. Стоит отметить, что длина волны управляющего лазера в этих экспериментах варьировалась в диапазоне от 1528 до 1560 нм. Наблюдаемый эффект в этом диапазоне длин волн повторяется и имеет близкие спектральные характеристики. Противоположную картину можно наблюдать в случае изменения мощности зеленого лазера. На рисунке 3d представлена зависимость нормированных значений интенсивности люминесценции NV^0 ($\mathrm{PL}_{\mathrm{GREEN+NIR}}/\mathrm{PL}_{\mathrm{GREEN}}$) от мощности зеленого лазерного излучения. При этом мощность ИК излучения (1528 нм) составляла 30 мВт. В данном случае мы видим, что максимальное гашение люминесцен-

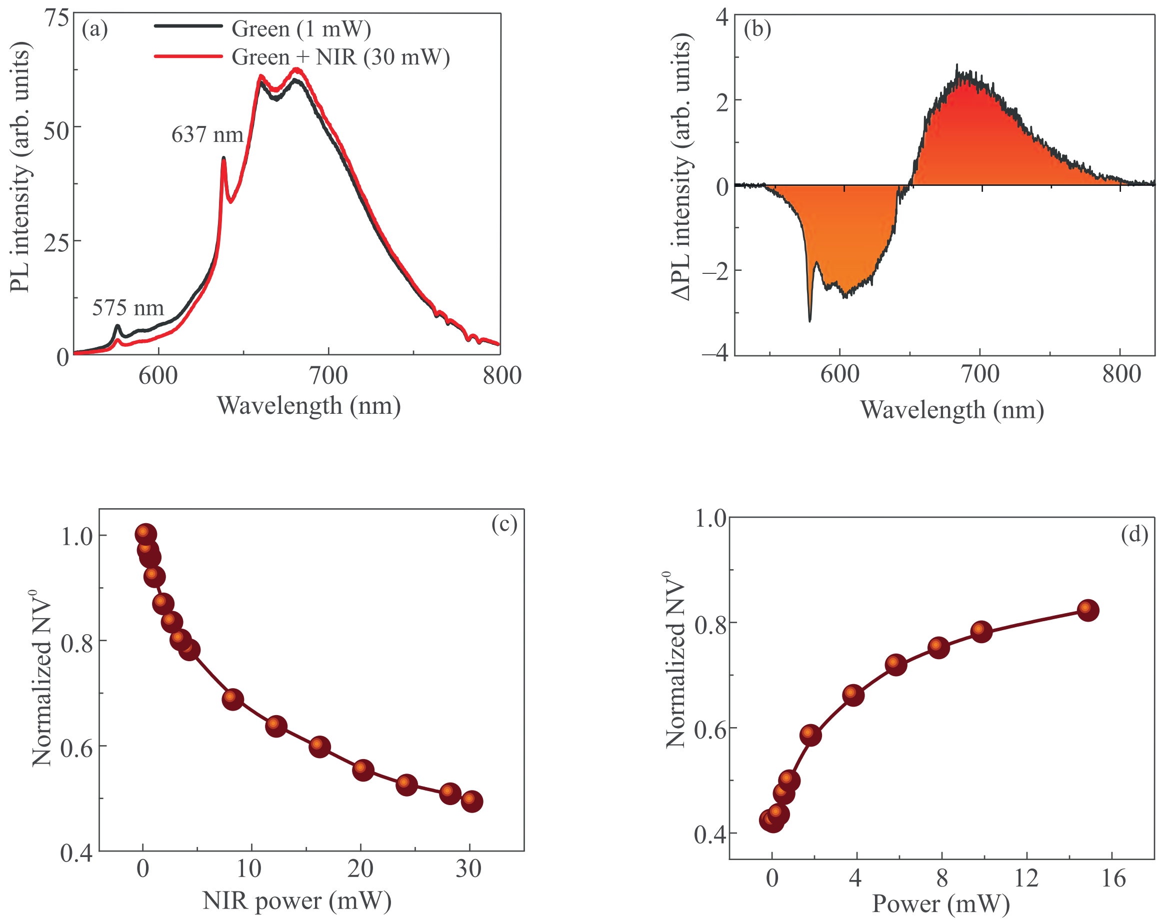

Рис. 3. (Цветной онлайн) Изменение спектра фотолюминесценции NV-центров при одновременном возбуждении непрерывными видимым и инфракрасным излучениями. (a) – Экспериментальный спектр фотолюминесценции NV-центров при возбуждении зеленым лазером (1 мВт, серая кривая), а также при добавлении излучения от инфракрасного лазера (30 мВт, красная кривая). (b) – Разность спектров фотолюминесценции ($\Delta PL = PL_{\mathrm{GREEN+NIR}} - PL_{\mathrm{GREEN}}$), вычисленная для предыдущего графика. (c), (d) – Зависимость нормированных значений интенсивности фотолюминесценции вблизи БФЛ NV^0 от мощности ИК (c) и зеленого (d) лазерного излучения. Мощность излучения ИК лазера на последнем графике составляла 30 мВт

ции $NV^0 \sim 60\,\%$ происходит при сравнительно малых значениях мощности зеленого лазера (несколько сотен микроватт).

Одной из возможных причин наблюдаемых эффектов может быть увеличение значения эффективного сечения рекомбинационного процесса NV-центров (σ^{re}), обусловленного возбуждением непрерывным ИК излучением других дефектов в кристаллической решетке алмаза. Аргументом в пользу этого предположения является тот факт, что в кристаллической решетке алмаза в процессе возникновения NV-центров могут образовываться азото-содержащие или иные дефекты неизвестной структуры, обладающие широкополосной линией поглощений в ближней ИК области и способные принимать участие в процессах обмена зарядом с другими дефектами [34]. Проведенные нами эксперименты на длине волны вблизи 1.55 мкм выгодно отличаются от экспериментов на длине волны вблизи 1.06 мкм, представленные в работах [29–31], поскольку были получены вдали от возможного резонансного перехода синглетного уровня NV^- (1.19 эВ или 1042 нм), что является подтверждением широкополосного характера данного эффекта зарядовой модуляции и может быть дополнительным аргументом в пользу предположения о влиянии на него со стороны других дефектов. В таком случае, дополнительные дефекты неизвестной структуры могут служить основным инструментом для управления зарядовым состоянием NV-центра с помощью непрерывного ИК лазерного излучения.

Полученные результаты показывают возможность эффективного гашения люминесценции NV^0 с помощью ИК лазерного излучения в области 1.5 мкм. При этом вся эта погашенная энергия переводится в люминесценцию от NV^-, что отчетливо видно на спектрах PL (см. рис. 3b). Данное обстоятельство может быть полезным для применений NV-центров в микроскопии сверхвысокого разрешения на основе опустошения зарядового состояния NV^0. Важное значение для практических приложений имеют временные параметры и масштабируемость метода модуляции на различные лазерные системы.

На рисунке 4 приведены временные зависимости PL исследуемых центров. Данные зависимости были получены при облучении алмаза последовательностью ИК импульсов с длительностью 50 мс и частотой 1 Гц. Импульсы вырезались из непрерывного ИК лазерного излучения с помощью АОМ, излучение от зеленого лазера было непрерывным. Динамические кривые имеют две релаксационные составляющие: первая имеет место при включении ИК излучения и обусловлена добавлением еще одного вклада в ионизационно-рекомбинационную динамику; вторая возникает при выключении ИК излучения и обусловлена возвращением системы в равновесное состояние, характерное для данных параметров накачки. На графиках рис. 4 видно, что после выключения ИК сигнала система сравнительно долго возвращается в равновесное состояние. Данная зависимость хорошо подгоняется суммой из двух затухающих экспонент с временами затухания ~ 50 и ~ 500 мс, при этом амплитуда "быстрой" экспоненты примерно в 36 раз больше "медленной". Столь медленные релаксационные времена, по сравнению с временами переключения зарядовых состояний, могут быть связаны с недостаточной точностью фокусировки и пересечения возбуждающих лазеров на поверхности образца. Данная задача может быть решена с помощью выбора более подходящего для ИК диапазона объектива и измерения фотолюминесценции в конфокальном режиме. Предварительные эксперименты с использованием фемтосекундного инфракрасного лазера (1550 нм, ~ 60 мВт) с длительностью импульсов ~ 200 фс и частотой следования 76 МГц показали похожую картину спектральной модуляции, изображенную на рис. 3b, не проявив признаков двухфотонного возбуждения или вынужденного испускания NV-центра. Это обстоятельство демонстрирует возможность масштабирования метода управления зарядовым состоянием также на импульсные лазерные системы с длиной волны вблизи 1.5 мкм.

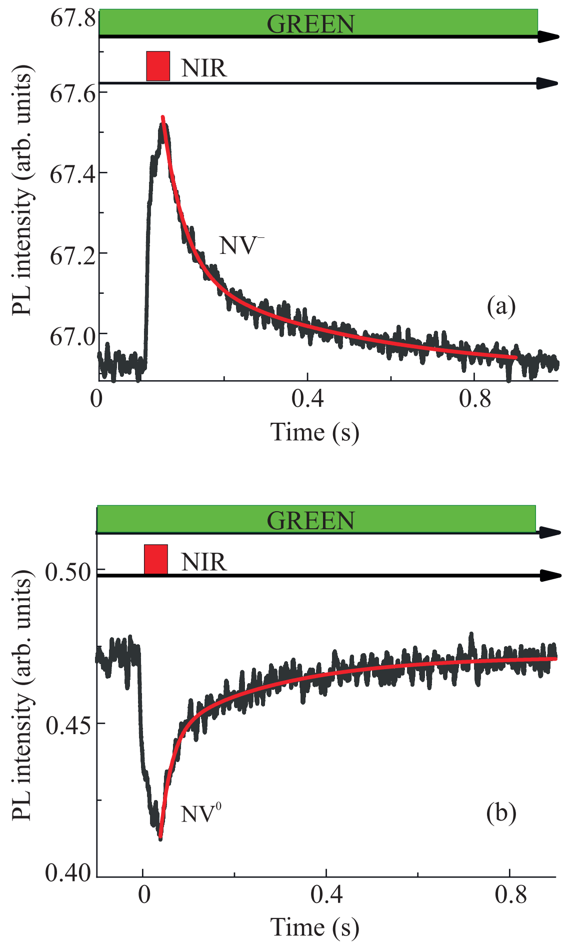

Рис. 4. (Цветной онлайн) Динамика фотолюминесценции NV-центров при их возбуждении смесью из непрерывного лазерного излучения (0.4 мВт) и последовательностью ИК лазерных импульсов, вырезаемых с помощью АОМ из непрерывного лазерного излучения (30 мВт). Длительность вырезаемых импульсов составляла 50 мс, а частота повторения 1 Гц. (a) – Динамика для NV^-. (b) – Динамика для NV^0. Красными линиями на графиках показана подгонка кривых с помощью экспоненциальных функций. Сверху каждого графика приведены используемые последовательности оптических импульсов

Таким образом, было проведено исследование фотолюминесцентных свойств ансамбля NV-центров в алмазе с высоким содержанием азотной примеси (~ 600 ppm) при его одновременном возбуждении с помощью зеленого (532 нм) и ближнего инфракрасного (вблизи 1550 нм) лазера. Результаты экспериментов показали, что под воздействием инфракрасного лазера в ансамбле NV-центров происходит перераспределение спектральной интенсивности фотолюминесценции, вызванное влиянием инфракрасного лазера на зарядовое состояние центров окраски.

Следствием этого перераспределения являлось подавление фотолюминесценции от NV^0, которое в наших экспериментах достигало $\sim 60\,\%$. Полученные результаты могут быть полезны для микроскопии сверхвысокого разрешения на основе опустошения зарядовых состояний благодаря обнаруженной возможности ослабления конкуренции со стороны процессов двухфотонного возбуждения NV-центров и вынужденного испускания ими фотонов.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 19-32-80029, 19-29-12062, 18-29-20031, 18-02-01091), а также Министерства науки и высшего образования РФ (госконтракт 14.Z50.31.0040, 17 февраля 2017 г.). Исследования И. В. Федотова и А. М. Желтикова выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 20-12-00088).

1. T. M. Babinec, B. J. Hausmann, M. Khan, Y. Zhang, J. R. Maze, P. R. Hemmer, and M. Lončar, Nat. Nanotechnol. **5**(3), 195 (2010).
2. I. Aharonovich, S. Castelletto, D. A. Simpson, C. H. Su, A. D. Greentree, and S. Prawer, Rep. Prog. Phys. **74**(7), 076501 (2011).
3. L. Childress, R. Walsworth, and M. Lukin, Phys. Today. **67**(10), 38 (2014).
4. Y. G. Ermakova, A. A. Lanin, I. V. Fedotov et al., Nat. Commun. **8**(1), 1 (2017).
5. I. V. Fedotov, N. A. Safronov, Yu. G. Ermakova, M. E. Matlashov, D. A. Sidorov-Biryukov, A. B. Fedotov, V. V. Belousov, and A. M. Zheltikov, Sci. Rep. **5**, 15737 (2015).
6. A. A. Lanin, I. V. Fedotov, Yu. G. Ermakova, D. A. Sidorov-Biryukov, A. B. Fedotov, P. Hemmer, V. V. Belousov, and A. M. Zheltikov, Opt. Lett. **41**(23), 5563 (2016).
7. I. V. Fedotov, S. Blakley, E. E. Serebryannikov, N. A. Safronov, V. L. Velichansky, M. O. Scully, and A. M. Zheltikov, Appl. Phys. Lett. **105**(26), 261109 (2014).
8. N. A. Safronov, I. V. Fedotov, Y. G. Ermakova, M. E. Matlashov, D. A. Sidorov-Biryukov, A. B. Fedotov, V. V. Belousov, and A. M. Zheltikov, Appl. Phys. Lett. **106**(16), 163702 (2015).
9. J. R. Maze, P. L. Stanwix, J. S. Hodges, S. Hong, J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Jiang, M. V. Gurudev Dutt, E. Togan, A. S. Zibrov, A. Yacoby, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, Nature **455**(7213), 644 (2008).
10. J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, L. Jiang, D. Budker, P. R. Hemmer, A. Yacoby, R. Walsworth, and M. D. Lukin, Nat. Phys. **4**(10), 810 (2008).
11. D. Le Sage, K. Arai, D. R. Glenn, S. J. DeVience, L. M. Pham, L. Rahn-Lee, M. D. Lukin, A. Yacoby, A. Komeili, and R. L. Walsworth, Nature **496**(7446), 486 (2013).
12. I. V. Fedotov, L. V. Doronina-Amitonova, D. A. Sidorov-Biryukov, N. A. Safronov, S. Blakley, A. O. Levchenko, S. A. Zibrov, A. B. Fedotov, S. Y. Kilin, M. O. Scully, V. L. Velichansky, and A. M. Zheltikov, Opt. Lett. **39**(24), 6954 (2014).
13. I. V. Fedotov, L. V. Doronina-Amitonova, D. A. Sidorov-Biryukov, N. A. Safronov, A. O. Levchenko, S. A. Zibrov, S. Blakley, H. Perez, A. V. Akimov, A. B. Fedotov, P. Hemmer, K. Sakoda, V. L. Velichansky, M. O. Scully, and A. M. Zheltikov, Opt. Lett. **39**(23), 6755 (2014).
14. K. Y. Han, K. I. Willing, E. Rittweger, F. Jelezko, C. Eggeling, and S. W. Hell, Nano Lett. **9**(9), 3323 (2009).
15. X. Chen, C. Zou, Z. Gong, C. Dong, G. Guo, and F. Sun, Light Sci. Appl. **4**(1), 1 (2015).
16. L. V. Doronina-Amitonova, I. V. Fedotov, and A. M. Zheltikov, Opt. Lett. **40**(5), 725 (2015).
17. M. Yamanaka, N. I. Smith, and K. Fujita, Microscopy **63**(3), 177 (2014).
18. G. Komis, M. Mistrik, O. Šamajova, M. Ovečka, J. Bartek, and J. Šamaj, Nat. Protoc. **10**(8), 1248 (2015).
19. M. J. Rust, M. Bates, and X. Zhuang, Nat. Methods. **3**(10), 793 (2006).
20. E. Betzig, G. H. Patterson, R. Sougrat, O. W. Lindwasser, S. Olenych, J. S. Bonifacino, M. W. Davidson, J. Lippincott-Schwartz, and H. F. Hess, Science **313**(5793), 1642 (2006).
21. S. Arroyo-Camejo, M.-P. Adam, M. Besbes, J. P. Hugonin, V. Jacques, J.-J. Greffet, J.-F. Roch, S. W. Hell, and F. Treussart, ACS Nano **7**(12), 10912 (2013).
22. H. Blom and J. Widengren, Chem. Rev. **117**(11), 7377 (2017).
23. M. W. Doherty, N. B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, and L. C. L. Hollenberg, Phys. Rep. **528**(1), 1 (2013).
24. P. Siyushev, H. Pinto, M. Vörös, A. Gali, F. Jelezko, and J. Wrachtrup, Phys. Rev. Lett. **110**(16), 167402 (2013).
25. N. Aslam, G. Waldherr, P. Neumann, F. Jelezko, and J. Wrachtrup, New J. Phys. **15**(1), 013064 (2013).
26. P. Ji, R. Balili, J. Beaumariage, S. Mukherjee, D. Snoke, and M. G. Dutt, Phys. Rev. B **97**(13), 134112 (2018).
27. I. V. Fedotov and A. M. Zheltikov, Opt. Lett. **44**(15), 3737 (2019).
28. L. Hacquebard and L. Childress, Phys. Rev. A **97**(6), 063408 (2018).
29. I. Meirzada, Y. Hovav, S. A. Wolf, and N. Bar-Gill, Phys. Rev. B **98**(24), 245411 (2018).
30. P. Ji and M. G. Dutt, Phys. Rev. B **94**(2), 024101 (2016).

31. B. Du, X. D. Chen, S. C. Zhang, Y. Dong, C. H. Li, G. C. Guo, and F. W. Sun, JOSA B **37**(5), 1468 (2020).
32. P. Ji and M. G. Dutt, Phys. Rev. B **94**(2), 024101 (2016).
33. M. A. Smirnov, I. V. Fedotov, S. A. Moiseev, and A. M. Zheltikov, J. Phys. Conf. Ser. **1410**(1), 012143 (2019).
34. R. U. A. Khan, P. M. Martineau, B. L. Cann, M. E. Newton, and D. J. Twitchen, J. Phys. Condens. Matter **21**(36), 364214 (2009).